

〈論 文〉

## 전자기력을 이용한 능동제진에 관한 연구

손태규\* · 김규용\*\* · 유원희\*\*\* · 박영필\*\*\*\*

(1993년 9월 8일 접수)

### A Study on Active Vibration Isolation Using Electro-Magnetic Actuator

Tae-Kyu Son, Kyu-Yong Kim, Won-He You and Young-Pil Park

**Key Words :** Active Vibration Isolation(능동방진), Optimal Control(최적제어), Feedforward Control(피드포워드제어), Fuzzy Control(퍼지제어), Adaptive Control(적응제어)

#### Abstract

Vibration isolation of mechanical systems, in general, is achieved through passive or active vibration isolators. Passive vibration isolator has an inherent performance limitation. Whereas, active vibration isolator provides significantly superior vibration-isolation performance at the cost of energy sources and sensors. Recently, in many cases, such as suspension system, precision machinery ... etc, active isolation system outweighs its limitation. Therefore, many studies, researches, and applications are carried out in this field. In this study, vibration-isolation characteristics of an active vibration control system using electromagnetic force actuator are investigated. Several control algorithms including optimal, feedforward are used for active vibration isolation. From the experimental results of each control algorithm, effective control algorithms for this active vibration-isolation system are proposed.

#### 기 호 설 명

$M$  : 본체질량

$C$  : 감쇠계수

$K$  : 강성계수

$f_a$  : 외력

$K_E$  : 전류강성

$K_e$  : 관측기이득

$K_x$  : 변위강성

$K_i$  : 작동기 앰프이득

$x_1$  : 상대변위

$x_2$  : 본체속도

$i(t)$  : 전류

$V(t)$  : 전압

$X$  : 계의 상태벡터

$U$  : 제어입력벡터

$W$  : 외란벡터

$\underline{A}$  : 플랜트행렬

$\underline{B}$  : 입력행렬

$\underline{C}$  : 출력행렬

$\underline{D}$  : 외란행렬

$y$  : 계의 출력상태벡터

$T$  : 이산화주기

$J$  : 성능지수행렬

$Q$  : 상태벡터의 가중행렬

$R$  : 입력벡터의 가중행렬

$S$  : 교차항의 가중행렬

\*정회원, (주) 삼성전자

\*\*정회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\*\*정회원, 정회원, (주) 삼성전자

\*\*\*\*정회원, 연세대학교 기계공학과

$\rho_1$	: 속도항의 가중치
$\rho_2$	: 상대변위항의 가중치
$\bar{x}_b$	: 관측상태벡터
$\rho$	: 관측기 설계시 가중치
$N(k)$	: 관측잡음
$N_s$	: 계의 잡음
$N_m$	: 측정잡음
$e(k)$	: 관측오차행렬
$J_{abs}$	: 관측기 성능지수
$a$	: 출력가중계수
$e(K)$	: 오차신호
$X(K)$	: 가진신호
$y(K)$	: 제어출력
$d(K)$	: 외란
$E[\ ]$	: 평균치
$W_n$	: 적응 필터가중계수
$MSE$	: 자승 평균오차
$W^*$	: 최적가중
$G(s)$	: 제어력과 본체가속도 사이의 전달함수
$G_n(s)$	: 바닥가속도와 본체가속도 사이의 전달함수
$K(s)$	: 보상기 전달함수
$GI(s)$	: 피드포워드 전달함수
NB	: negative big
NM	: negative middle
NS	: negative small
ZE	: zero equal
PS	: positive small
PM	: positive middle
PB	: positive big

## 1. 서 론

생산설비에 있어서 각종 장비는 그 특성상 진동 가진원으로서 작용한다. 그러므로 그 영향에 의하여 제품의 정밀도 저하, 더 나아가 생산성의 저하를 초래할 수 있다. 특히 반도체 제조공정 등과 같이 종래에는 진동에 의한 영향을 고려하지 않았던 분야에 있어서 새로운 문제점으로 부각되고 있다. 이러한 진동에 의한 영향을 배제하기 위하여 제진 분야에 대하여 관심을 가지게 되었다.

제진방법은 일반적으로 스프링, 댐퍼와 같은 수동소자를 이용하는 수동제진(passive vibration)과 댐핑상수와 같은 시스템 파라미터를 능동적으로 변

화시켜 제진에 이용하는 반능동제진(semi-active vibration isolation) 그리고 작동기를 이용하여 진동계에 외력을 가함으로써 제진특성을 얻는 능동제진(active vibration isolation)으로 나눌 수 있다. 수동제진은 제진 주파수영역과 크기가 수동소자의 고유한 특성으로 제한되며 반능동제진은 에너지의 소모와 안정성에서 많은 장점을 갖지만 제진성능은 능동제진에 비해서 떨어진다. 반면에 작동기력을 이용하는 능동제진은 높은 제진효과를 갖는다. 능동제진에 대한 연구는 철도차량과 자동차의 주행 안정성과 승차감을 높이는 분야를 중심으로 연구되어 왔는데 최근에는 초정밀 측정과 가공 그리고 광학, 레이저같은 분야에서도 제진의 중요성이 크게 대두됨에 따라서 활발히 연구 적용되고 있다. 진동제진분야에 대한 연구결과를 살펴보면 다음과 같다. 1969년 Schubert는 유압장치를 이용한 1자유도계의 능동제진에 대한 기초이론을 정립하고 실험을 통하여 제진효과를 확인하였다. 1974년 Karnopp는 반능동식(semi-active type) 제진이론을 제시하고 노면에서 가진을 받는 1자유도 진동모델에 적용하여 능동제진과 유사한 효과를 얻었다. 1990년 Hong Su는 전자기력을 이용한 작동기를 1자유도 진동계의 능동제진에 적용하여 상태공간 해석을 이용한 제어기법을 통해서 변위, 상대변위, 속도 등의 귀환상태변수에 따른 제진특성과 귀환이득의 한계를 수치해석을 통하여 제시하였다. 본 연구는 유압, 공압 작동기보다는 작동력이 작지만 비교적 높은 임계 작동주파수를 가지고 있는 전자석 작동기를 이용하여 지반에서 가진을 받는 1자유도 진동계를 능동제진함으로써 제진성능 향상을 목적으로 한다. 연구에서 사용한 전자석 작동기는 강한 비선형 특성을 가지고 있다. 비선형 미분방정식에 대한 해는 제한적인 경우에만 존재하므로 수학적인 모델링에 기초한 비선형제어는 공학적인 가정이 필요하다. 그러므로 수학적 모델링에 의한 제어 알고리즘을 전자석 작동기에 적용시키는데는 한계가 있다. 그러므로 선형제어이론 중 최적제어와 피드포워드제어를 이용하여 이론해석 및 실험해석하였고, 언어적인 추론을 바탕으로 하는 퍼지제어와 계속적으로 변화하는 진동계의 파라미터를 추정하여 제진에 이용하는 적응 제어알고리즘을 전자석 작동기를 이용하는 1자유도 진동제진장치에 적용하여 특성을 검토하였다.

## 2. 이론해석

### 2.1 대상계의 개요

대상 진동계는 베이스를 통하여 가진되는 스프링과 본체로 이루어진 1자유도 진동계를 사용하였다. 진동을 능동적으로 제어하기 위한 작동기는 영구자석과 전자석을 조합하여 만든 전자석 작동기를 본체와 베이스 사이에 설치하였다. 작동기는 동일한 극이 서로 마주보는 2개의 영구자석과, 이 사이에 전자석이 설치된 구조를 가지고 있으므로 전자석을 작동시킬 때 한면이 인력을 받으면 반대면은 척력을 받아 능동작동기로 작용한다. 영구자석은 본체와 같이 운동하고 전자석은 베이스에 고정되어 있다. 계의 구성은 Fig. 1과 같다.

### 2.2 운동방정식

베이스에서 가진을 받는 1자유도 진동계에서  $x_1$ 은 본체의 변위,  $x_0$ 는 베이스의 변위,  $f_a$ 는 계에 가해지는 외력일 때 그 지배방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{x}_1 + C(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) + K(x_1 - x_0) = f_a \quad (1)$$

임계주파수 이하의 저주파수 대역에서는 작동기가 선형성을 가지고 있다고 가정하여 작동기에서 발생하는 힘을 영구자석과 전자석 사이의 간격, 즉 본체와 베이스사이의 상대변위 그리고 코일에 흐르는 전류의 1차식으로 나타내고 실험방법을 통하여 선형화된 식을 다음과 같이 구하였다.

$$f_a = K_E i(t) + K_x(x_1 - x_0) \quad (2)$$

$$i(t) = K_i V(t) \quad (3)$$

식(3)에서  $V(t)$ 는 제어기의 출력전압이고,  $i(t)$ 는 전자석 코일에 흐르는 전류이다. 위의 운동방정식과 작동기식, 그리고 작동기 구동앰프 관계식을

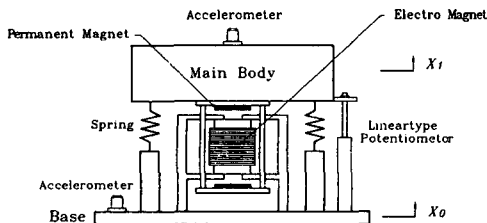


Fig. 1 Schematic diagram of electro-magnetic vibration isolator

상태공간 방정식으로 표현하면

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{(K-K_x)}{M} & -\frac{C}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_E K_i}{M} \end{bmatrix} V(t) + \begin{bmatrix} -1 \\ \frac{C}{M} \end{bmatrix} \dot{x}_0 \quad (4)$$

여기서,  $X_1$ 는 상대변위 ( $x_1 - x_0$ ),  $X_2$ 는 본체의 속도  $\dot{x}_1$ 이다.

인가전압  $V(t)$ 를 입력  $U$ , 베이스의 속도  $\dot{x}_0(t)$  외란  $W$ , 상태벡터를  $X$ , 출력행렬을  $C$ 라 상하면 다음과 같은 전형적인 상태공간 방정식이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \underline{A}X + \underline{B}U + \underline{D}W \\ y &= \underline{C}X \end{aligned} \quad (5)$$

위의 상태공간 모델에 제어이론을 이용하여 구한 귀환이득행렬  $K$ 를 이용하여 입력을 결정한다.

$$U = -KX \quad (6)$$

귀환제어계의 블록선도는 Fig. 2와 같다.

### 2.3 디지털 제어를 위한 계의 이산화

식(4)의 상태공간 방정식은 연속시간계이므로 디지털제어를 위하여 샘플링시간  $T$ 로 하고 영차홀더를 사용하여 이산시간계로 표현하면,

$$\begin{aligned} X(K+1) &= \underline{A}_d X(K) + \underline{B}_d u(k) + \underline{D}_d W(K) \\ y(K) &= \underline{C}_d X(K) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$\underline{A}_d = e^{\underline{A}T}, \quad \underline{B}_d = \int_0^T e^{\underline{A}t} \underline{B} dt, \quad \underline{D}_d = \int_0^T e^{\underline{A}t} \underline{D} dt$$

디지털제어에서 샘플링주파수는 일반적으로 페루

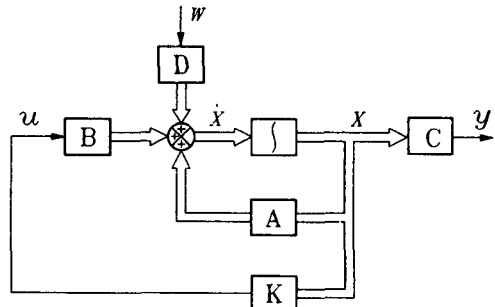


Fig. 2 Block diagram of state-space feedback control

프계 대역폭의 10배 이상으로 취한다.

2.4 최소차 관측기 설계

상태변수를 측정할 수 없는 경우에는 관측기를 사용하여 관측한다. 관측기는 결정항(deterministic term)으로만 구성한다. 상태방정식을 측정되어지는 항과 관측되는 항으로 분리하면 식(8)같이 표현할 수 있다. 여기서,  $X_a(K)$ 는 측정가능한 상태변수인 상태변위이고,  $X_b(K)$ 는 관측되는 상태변수인 본체의 속도이다.

$$\begin{bmatrix} X_a(K+1) \\ X_b(K+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} \\ A_{ba} & A_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a(K) \\ X_b(K) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_a \\ B_b \end{bmatrix} u(K)$$

$$y(K) = [I \quad 0] \begin{bmatrix} X_a(K) \\ X_b(K) \end{bmatrix} \quad (8)$$

식(8)에서 관측기 이득을 정하여 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{X}_b(K+1) &= [A_{bb} - K_e A_{ab}] \tilde{X}_b(K) + A_{ba} X_a(K) \\ &\quad + B_b u(K) - K_e [X_a(K+1) \\ &\quad - A_{aa} X_a(K) - B_a u(K)] \end{aligned} \quad (9)$$

최소차 관측기를 이용한 제어계의 블록선도는 Fig. 3과 같다.

3. 제어알고리즘

3.2 개요

1자유도 능동제진장치에 적용한 제어알고리즘은 대상계와 작동기, 앰프의 동적인 거동을 선형식으로 표현하여 제어를 구현하는 선형제어와 진동계의 동적인 거동을 언어적으로 표현하고 추론하여 제어에 적용하는 퍼지제어 그리고 시간에 따라 변화하는 계의 파라미터 특성을 추정하여 제어에 적용하는 적응제어를 사용하였다. 선형 제어알고리즘은

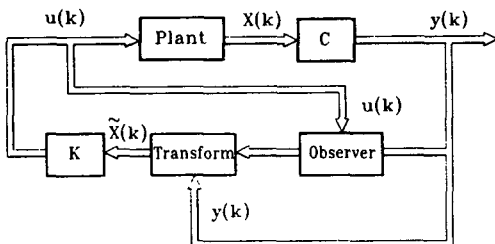


Fig. 3 Observed-state feedback control with minimum order observer

최적제어, 비례미분제어, 피드포워드제어이고, 적응제어에서는 적응신호처리(adaptive signal processing)에서 사용되는 계의 동정(system identification)을 사용하였다.

3.2 최적제어

3.2.1 성능지수의 선정

상태방정식을 이용하여 상태변수와 제어입력의 제곱의 합을 시간에 대해 적분한 함수를 성능지수로 취하고 이를 최소화시키는 최적 귀환이득행렬을 구하였다. 성능지수(Performance Index)는 본체의 속도, 본체와 베이스사이의 상태변위 그리고 제어입력을 최소화 시키도록 선정한다.

$$J = \int_0^{\infty} (\rho_1 \dot{x}^2 + \rho_2 (x_1 - x_0)^2 + \rho_3 u^2) dt \quad (10)$$

3.2.2 디지털 최적제어기의 설계

계가 가제어(controllable)하므로 이산시간계 모델에 디지털 최적 제어이론을 적용할 수 있다. 식(10)의 성능지수는 이산화과정을 통하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} [X^T(K) Q X(K) + 2X^T(K) S u(K) + u^T(K) R u(K)] \quad (11)$$

제어입력과 상태변수가 상관되어 있으므로 일반적인 형태로 변환하기 위하여

$$\begin{aligned} \tilde{Q} &= Q - S R^{-1} S^T \\ \tilde{A}_d &= A_d - B_d R^{-1} S^T \\ \nu(K) &= R^{-1} S^T X(K) + u(K) \end{aligned}$$

로 정의하면, 성능지수는

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} [X^T(K) \tilde{Q} X(K) + \nu^T(K) R \nu(K)] \quad (12)$$

로 표현가능하고, 정상상태 제어대수 리카티식(CARE)과 귀환이득행렬 K는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{P} &= \tilde{A}_d^T \tilde{P} \tilde{A}_d + \tilde{Q} - \tilde{A}_d^T \tilde{P} B_d [B_d^T \tilde{P} B_d + R]^{-1} B_d^T \tilde{P} \tilde{A}_d \quad (13) \\ K &= -[R + B_d^T \tilde{P} B_d]^{-1} [B_d^T \tilde{P} \tilde{A}_d + S^T] \quad (14) \end{aligned}$$

따라서 정상상태 최적 제어력 u(K)는

$$u(K) = -K X(K) \quad (15)$$

로 결정한다.

3.2.3 최적 최소차 관측기의 설계

관측기의 이득행렬은 계에 가해지는 외란과 측정 잡음을 백색잡음으로 가정하여 추정되는 상태변수와 실제 상태변수의 차이의 자기상관을 최소화 시키는 최적 관측이득행렬을 사용한다. 외란 및 측정 잡음을 백색잡음으로 가정하고 관측기의 초기상태를 다음과 같이 가정할 수 있으면 칼만필터(Kalman filter) 이론을 적용할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E[X_b(0)] &= \bar{X}_b \\
 E[N_s(K)] &= 0 \\
 E[N_m(K)] &= 0 \\
 E\{[X_b(0) - \bar{X}_b(0)][X_b(0) - \bar{X}_b(0)]\} &= P_0 \\
 E[N_s(j)N_m(K)^T] &= 0 \\
 E[N_s(j)N_s(K)^T] &= Q_{obs}\delta_{jk} \\
 E[N_m(j)N_m(K)^T] &= R_{obs}\delta_{jk} \\
 E\{[X_b(0) - \bar{X}_b(0)]N_s(K)^T\} &= 0 \\
 E\{[X_b(0) - \bar{X}_b(0)]N_m(K)^T\} &= 0
 \end{aligned}$$

추정오차벡터  $e(K)$ 와 추정성능계수  $J_{obs}$ 를

$$\begin{aligned}
 e(K) &= X_b(K) - \bar{X}_b(K) \\
 J_{obs} &= E[e(K)^T e(K)] \tag{16}
 \end{aligned}$$

로 정의한다.  $J_{obs}$ 를 최소화하는 정상상태 필터대수 리카티식(FARE)과 관측기의 이득행렬은 다음의 식(17)과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 P &= A_{bb}PA_{bb}^T + Q_{obs} \\
 &\quad - A_{bb}PA_{ab}^T[A_{ab}PA_{ab}^T + R_{obs}]^{-1}A_{ab}PA_{bb}^T \tag{17} \\
 K_e &= A_{bb}PA_{ab}^T + [R_{obs} + A_{bb}PA_{ab}^T]^{-1} \tag{18}
 \end{aligned}$$

3.3 피드포워드제어

최적제어와 같은 귀환제어를 이용한 능동제진에서 진동의 크기는 대체로 줄어들지만 공진주파수 대역은 존재한다. 만약 외부가진을 측정할 수 있고, 진동계의 전달함수를 안다면 피드포워드제어(feedforward control) 알고리즘을 적용하여 이론적으로는 모든 주파수영역에서 진동을 제거할 수 있다. 식(4)를 라플라스변환하여 제어입력 대 본체가속도  $G(s)$ , 베이스 가진가속도 대 본체가속도  $G_n(s)$ 를 구하면

$$G(s) = \frac{\ddot{X}_1(s)}{V(s)} = \frac{K_E K_I s^2}{Ms^2 + K - K_x} \tag{19}$$

$$G_n(s) = \frac{\ddot{X}_1(s)}{\dot{X}_0(s)} = \frac{K - K_x}{Ms^2 + K - K_x} \tag{20}$$

제진성능을 높이기 위해서는 외부가진이 진동계

의 출력에 미치는 영향이 작아야 한다. 외부가진을 받는 진동계에 있어서 귀환 제어알고리즘을 적용한 출력함수는 식(21)과 같다. 이 식에서  $K(s)$ 는 보상기전달함수이다.

$$y(s) = \frac{G(s)K(s)}{1+G(s)K(s)}r(s) + \frac{G_n(s)}{1+G(s)K(s)}d(s) \tag{21}$$

이 경우 계의 출력함수는 식(22)과 같다. 측정된 외란을 식(23)을 만족하는 외란조거 보상기  $GI(s)$ 를 거쳐서 피드포워드시키면 계의 출력에서 외란의 영향이 제거된다.

$$\begin{aligned}
 y(s) &= \frac{G(s)K(s)}{1+G(s)K(s)}r(s) \\
 &\quad + \frac{G_n(s) + G(s)GI(s)K(s)}{1+G(s)K(s)}d(s) \tag{22}
 \end{aligned}$$

$$GI(s) = -\frac{G_n(s)}{G(s)K(s)} \tag{23}$$

피드포워드 제어계의 구성은 다음 Fig. 4와 같다.

3.4 퍼지제어

3.4.1 퍼지논리제어

퍼지제어에서는 퍼지논리를 기초로 하고 있으며, 퍼지논리는 기존의 논리체계 보다는 더욱 인간의 사고방식과 제어체계에 유사한 논리이며 불확실성과 대략적인 사실을 표시하는 효과적인 수단을 제공한다. 그러므로 제어에 있어서 대상계에 대한 정보가 언어적 수단으로만 가능한 경우나, 수학적으로는 표현하기 힘든 경우에는 퍼지논리를 이용한 제어기를 유용하게 사용할 수 있다. 또한 퍼지제어에서는 해석적인 제어방법보다 감도(sensitivity)가 작고 강건(robust)하다는 실험결과가 보고되고 있다. 퍼지논리 제어기의 구조는 Fig. 5와 같은 퍼지

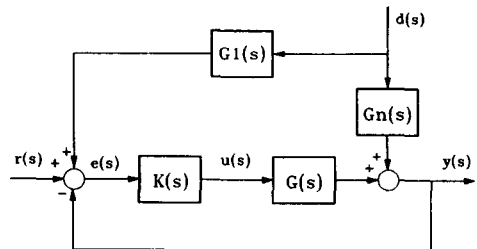


Fig. 4 Block diagram of feedforward control

화(fuzzification), 역퍼지화(defuzzification) 그리고 의사결정논리(decision making rull)의 세부분으로 나눌 수 있다. 일반적으로 대상 플랜트는 애매하지않은 계로 구성되어있으며 퍼지논리 제어기는 모든 집합이 퍼지집합의 연산으로 구성되게 된다. 그러므로 두가지의 서로 다른 시스템을 연결시켜 주는 장치가 필요하게 되며 퍼지화, 역퍼지화가 그역할을 담당한다.

3.4.2 퍼지화

일반적으로 측정되어지는 데이터는 애매하지 않은 값을 갖지만 퍼지제어기 내부의 데이터 연산과정은 퍼지논리를 바탕으로 하고 있으므로 퍼지화(fuzzification)는 측정된 오차신호를 퍼지추론할 수 있는 퍼지집합으로 변환시키는 기능을 한다. 퍼지화는 제어계의 제어량을 -1에서 1까지의 값으로 정규화(normalize)한 다음 Fig. 6과 같이 구성된 퍼지집합을 만든다. 각각의 퍼지집합의 원소가 갖는 멤버십(membership)함수의 모양은 정규분포와 비슷하므로 노이즈에 강하고 계산이 간단한 이등변 삼각형법을 많이 사용한다.

3.4.3 결정논리

결정된 퍼지집합을 이용하여 설계자가 알고 있는 지식을 바탕으로 추론을 행하여 결정논리(decision making logic)를 정한다. 설계자의 결정논리를 확장하여 7개의 원소로 구성된 퍼지집합에 대하여 퍼

지규칙을 구성하면 Fig. 7과 같다.

3.4.4 역퍼지화

기본적으로 역퍼지화는 애매한 값을 애매하지 않은 값으로 대응시키는 것을 말하며 계를 제어할때 정확한 제어값을 발생시키기 위하여 사용된다. 그러므로, 역퍼지화(defuzzification)는 추론된 퍼지 제어 값으로부터 가장 좋은 가능성 분포를 갖는 애매하지 않은 값을 만들어 내는 것을 목표로 한다. 일반적으로 쉽게 사용할수 있는 역퍼지화방법으로는 최대 내적방법(max-product method)이 있다. 최대 내적방법을 설명하면 Fig. 8과 같다. 최대 내적방법에 의하여 결정된 값의 역정규화는 제어입력, 제어성능 등으로 고려한 다음 1차 함수 또는 3

	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZE
$\mu_E$	PM	PM	PM	PS	PS	ZE	NS
	PS	PM	PM	PS	PS	ZE	NS
	ZE	PM	PS	PS	ZE	NS	NS
	NS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM
	NM	PS	ZE	NS	NS	NM	NB
	NB	ZE	NS	NS	NM	NB	NB
		NB	NM	NS	ZE	PS	PB

Fig. 7 Fuzzy rule

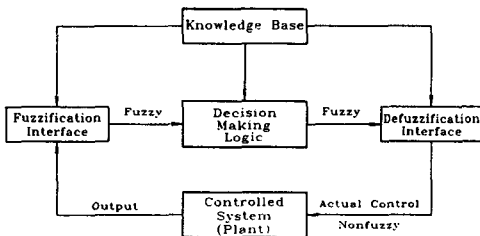


Fig. 5 Fuzzy logic controller

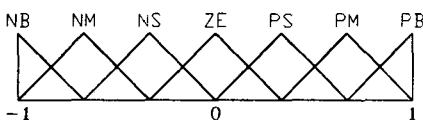
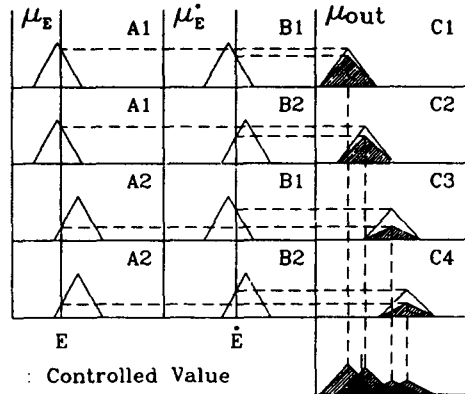


Fig. 6 Fuzzy set



E : Controlled Value  
 $\dot{E}$  : Derivative of E  
 O1 : Normalized Final Output

Fig. 8 Max-product method

차 함수와 같은 함수를 이용한다. 1차 함수를 사용한 역퍼지화 식은 다음과 같다.

$$u_{out} = aX$$

여기서,  $a$ 는 출력가중계수,  $X$ 는 퍼지한 출력이다.

### 3.5 적응제어

#### 3.5.1 유한 충격응답필터

대부분의 제어 작동기는 시간함수이며 비선형특성을 가지고 있으므로 시불변선형모델(linear time-invariant model)은 한계가 있다. 그러므로 계를 시변선형계(linear time-varying system)로 가정하여 제어기를 계의 동적거동에 따라 적응해가는 능동제어기법을 사용한다. 적응신호처리(adaptive signal processing)중 계의 동정(system identification)을 1자유도 진동계에 적용하여 베이스가진에 대하여 진동계와 동일한 출력값을 갖도록 적응시켜 나가는 디지털필터 즉, 제어기를 구성한다. 적응제어에서는 베이스가진이 입력이되므로 베이스가진을 측정할 수 있어야 한다. 필터는 유한 충격응답필터(finite impulse response filter)로 구성한다. Fig. 9는 적응제어의 블록선도이다.

$$y(k) = \sum_{n=1}^N W_n X(k-n) \quad (24)$$

$$e(k) = d(k) + y(k) \quad (25)$$

이 식에서의  $W_n$ 은 피드포워드 계수집합을 나타낸다. 또  $W^T$ 와  $X^T$ 를 다음과 같이 정의하면

$$W^T = [w_0, w, \dots, w_N]$$

$$X^T = [X(k), X(k-1), \dots, X(k-N)] \quad (26)$$

필터출력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y(k) = W^T X(k)$$

$$e(k) = d(k) + X(k) W^T \quad (27)$$

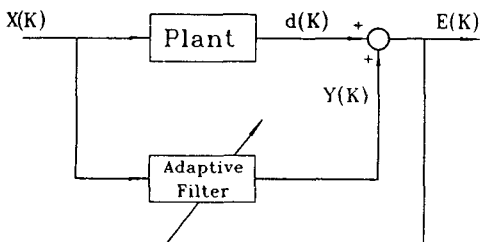


Fig. 9 Block diagram of adaptive control using FIR filter

#### 3.5.2 평균 자승오차법

계의 출력  $d(k)$ 를 소거시키는 제어입력신호  $y(k)$ 를 얻는 것이 목적이므로  $e(k)$ 를 최소화시키는 제어알고리즘을 찾는다. 그 방법으로 평균 자승오차법(mean square error method)을 이용한다. 출력오차의 제곱에 대한 기대값을 취하면 평균 자승오차는 다음과 같다.

$$MSE = E[e^2(k)] \quad (28)$$

평균 자승오차를 필터계수에 대하여 미분하여 그 값이 0(zero)이 되는 점의 필터계수값이 최소값이 된다.

$$\nabla_w [E\{e^2(k)\}] = 2E\{d(k)X(k)\} + 2E\{X(k)X^T(k)W\} \quad (29)$$

정의 :  $R = E[X(k)X^T(k)]$

$$P = E[d(k)X(k)]$$

식(29)에 의해 최적값을 구하면 다음과 같다.

$$W^* = -R^{-1}P \quad (30)$$

#### 3.5.3 Steepest Descent Method

위식에서 모든 2차 통계값을 알 수 있다면 이 가중치들을 계산할 수 있다. 그러나 일반적으로 이 값들은 온라인 제어에서 알 수 없고, 구한다 해도 역행렬 계산때문에 실제적인 제어에서 구현하기 어렵다. 그러므로 필터가 미지의 통계값에 적응하여 추정하도록 필터를 구성한다. 이를 위하여 반복적으로 평균 자승오차의 기울기를 찾아나가면서 오차의 최소값을 추정하는 Steepest Descent Method를 사용하고 미지의 통계값들은 순간값으로 추정한다. 이 방법은 반복적으로 평균자승오차의 기울기를 찾아가면서 기울기의 반대방향으로 평균 자승오차가 최소값이 되는 최적값을 찾아간다.

$$|W(k+1) - W^*| < |W(k) - W^*| \quad (31)$$

$$W(k+1) = W(k) - \mu \nabla_w e(k) \quad (32)$$

여기서,

$$\nabla_w e(k) = \nabla_w E[e^2(k)] \quad (33)$$

상첨자 2는 기울기에 대한 가중값으로서 수렴계수를 나타낸다. 식(29)를 식(32)에 대입, 정리하면

$$W(k+1) = W(k) - \mu \nabla_w [E\{e^2(k)\}]$$

$$= W(k) - 2\mu [RW + P] \quad (34)$$

3.5.4 최소 평균자승법

위식에서 기울기를 찾을때 통계값이 필요하나 이 통계치들은 실제 제어에서는 온라인으로 얻을 수 없으므로 순간적인 값으로 통계치로 추정(estimation) 한다. 즉,

$$\begin{aligned} R &\cong X(k)X^T(k) \\ P &\cong d(k)X(k) \end{aligned} \quad (35)$$

식(30)에 이 추정치들을 대입하여 정리하면 최적값을 찾아나가는 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{W}(k+1) &= \tilde{W}(k) - 2\mu[d(k)X(k) \\ &\quad + X(k)X^T(k)\tilde{W}] \\ &= \tilde{W}(k) - 2e(k)X(k) \end{aligned} \quad (36)$$

추정값을 나타내는 기호  $\sim$ 를 생략하면 최종식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y(k) &= W^T X(k) \\ e(k) &= d(k) + y(k) \\ W(k+1) &= W(k) - 2\mu e(k)X(k) \end{aligned} \quad (37)$$

4. 실험장치 및 방법

4.1 실험장치

실험대상 진동계를 가진기 위에 장치하고 가진기를 통하여 베이스를 가진한다. 가진기의 가진주파수신호는 외부에서 가진기 구동앰프로 입력시킨다. 외부신호는 HP3562A 신호분석기를 이용하여 단일 주파수신호 또는 sweep sine신호를 출력한다. 디지털제어를 위해서 12 bit 해상도를 갖는 A/D 변환기를 이용하여 센서의 정보를 PC에 입력하고 PC에서는 각 제어알고리즘에 따라 제어이득을 계산한다. 계산된 제어신호는 12 bit D/A변환기를 이용하여 전자식 작동기를 구동하는 앰프로 출력한다. 앰프의 출력단은 전자식의 코일에 연결되어 원하는 힘을 출력하도록 하였다. 센서는 진동계의 본체와 베이스에 가속도계를 사용하였다. 능동제진장치의 특성을 파악하기 위해 단일 주파수가진에 대한 응답특성과 적절한 sweep rate를 갖는 sweep sine신호로 베이스를 가진하여 베이스가속도 대 본체가속도의 비로 전달율을 구하였다. 진동계는 비선형 특성을 가지고 있으므로 sweep rate와 sweep 방향에 따라 전달율은 다소 변화한다. 여러실험에서 전달율은 sweep rate 0.5 Hz/sec로 3 Hz부터 33 Hz 까지 고주파수 방향으로 증가시키면서 구하

였다. 실험장치의 개략도는 Fig. 10과 같다.

4.2 최적제어

4.2.1 전 상태변수측정 최적제어

상대변위는 선형 포텐시오미터를 이용하여 측정하였고, 본체의 속도는 가속도계를 이용하여 용량형앰프로 내장된 아날로그 적분회로를 사용하여 얻었다. 디지털제어를 위한 샘플링주파수는 1 kHz로 하였다. 최적 귀환이득은 작동기의 출력범위내에서 제진성능을 향상시키는 적절한 값을 구하였다. 성능지수에서 상태변수에 관련된 가중치  $\rho_1, \rho_2$ 는 고정시키고 제어입력에 관계된 가중치  $\rho_3$ 를 변화시키면서 제어계가 갖는 극점과 최적 귀환행렬, 그리고 2차계의 동특성을 구하여 실험하였다.

4.2.2 최적 최소차 관측기를 이용한 최적제어

일반적으로 제어계의 상태변수 모두를 측정하는 것은 불가능하므로 본 연구에서는 상태변수중 상대변위는 측정하고 본체의 속도는 Kalman Filter를 이용하여 추정하였다.

4.3 퍼지제어

실험시 본체의 가속도를 가속도계를 이용하여 측정하였고, 측정된 가속도를 수치적으로 미분하여 가속도의 변화율로 사용하였다. 역퍼지화에는 1차 함수를 사용하였고 출력가중계수를 변화시키면서 제어성능을 검토하였다. 퍼지제어에서는 제어이득의 계산에 많은 시간이 소요되므로 샘플링주파수를 200 Hz로 하였다.

4.4 적응제어

제어효과에 직결되는 계의 동정특성은 필터가중치의 개수, 수렴계수, 필터의 가중치의 초기조건에

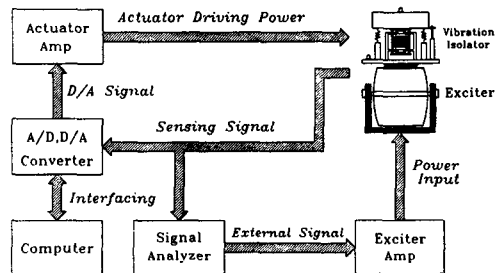


Fig. 10 Schematic diagram of experimental set-up



Table 1 Experimental apparatus

Apparatus	Specification	Manufacture/Type
Spring-mass system	Mass : 8.26 Kg Spring const. : 17480 N/m	
Magnetic actuator	Resistance : 6.30 $\Omega$ Reactance : 70.6 mH	
Permanent Magnet	Magnetic flux density : 1500 Gauss	
Actuator Amp	Voltage source type	
Signal analyzer	2 Ch	HP3562A
Accelerometer	Charge sens. : 98.2 pC/g Voltage sens. : 84.2 mV/g	B&K 4370
Charge Amp.	① 3 Ch/② 1 Ch	① Kistler/② B&K2635
Linear potentiometer	Stroke : 50 mm Linearity : $\pm 0.5\%$	MIDORI LP50
Exciter	Freq. Range : 3~3 KHz HzLimited Force : 979 N	Ling dynamics 520
Computer	IBM AT compat.	
A/D, D/A Converter	A/D : 16 Ch, D/A : 2 Ch	NANOTECH

따라 결정된다. 유한 충격응답 필터의 차수가 높을수록 동정특성은 좋아지나 실시간제어에는 취할수 있는 차수에 한계가 있다. 계를 동정하기에 충분한 차수를 갖는 경우에도 가중치의 초기조건, 수렴계수에 따라서 계는 국부최소(local minimum)에 빠지거나 발산할수 있다. 그러므로 이값들의 선정은 경험에 의존할 수 밖에 없으므로 좋은 특성을 얻으려면 많은 실험을 반복하여야 한다. 본 연구에서는 가중치의 초기조건을 모두 0으로 하고, 수렴계수는 실험적으로 결정하여 고정시킨 다음, 가중치의 개수를 적절히 변화시키면서 제진성능을 검토하였다.

## 5. 결과 및 고찰

### 5.1 최적제어

Fig. 11~Fig. 14는 모든 상태변수를 측정된 경우에 진동계의 공진주파수인 7 Hz로 베이스를 가진 하였을때 본체의 상대변위, 속도, 가속도 그리고 제어입력을  $\rho_3$ 의 변화에 따라 도시하였다. 각 상태량은  $\rho_3$ 가 감소할 수록 즉, 귀환이득이 커질수록

크기가 작아지고, 제어입력은 그와 반대로 점차 증가하였다. Fig. 15~Fig. 18은 위의 각 경우에 대하여 진동전달율의 측정결과와 수치해석결과를 비교하였다. Fig. 19는 관측기의 관측성능을 도시한 측정결과로서, 최소차 관측기로 관측한 본체의 속도와 실제속도를 실험적으로 비교한 것이다. 관측한 속도는 실제속도와 위상과 크기에서 비슷한 신호출

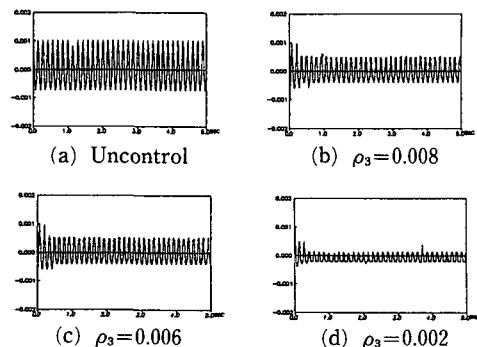


Fig. 11 Experimental results of optimal control (relative displacement)

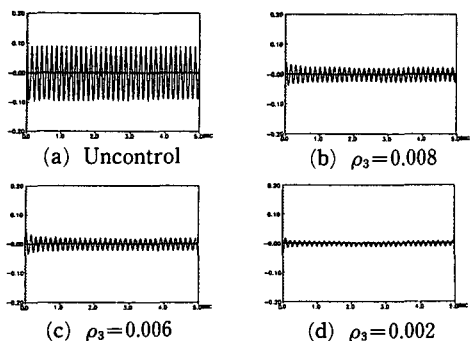


Fig. 12 Experimental results of optimal control (velocity)

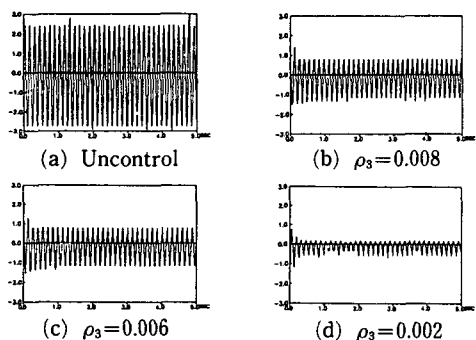


Fig. 13 Experimental results of optimal control (acceleration)

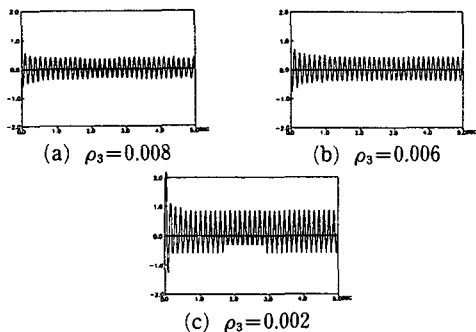


Fig. 14 Experimental results of optimal control (controller voltage)

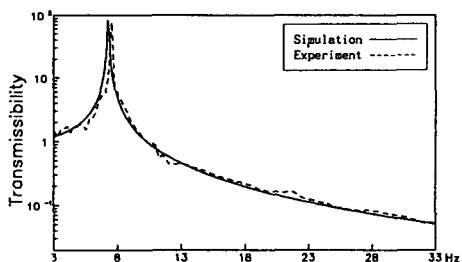


Fig. 15 Uncontrolled characteristics of vibration isolator

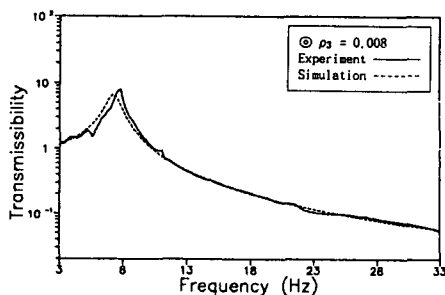


Fig. 16 Vibration characteristics of active system employing optimal control ( $\rho_3=0.008$ )

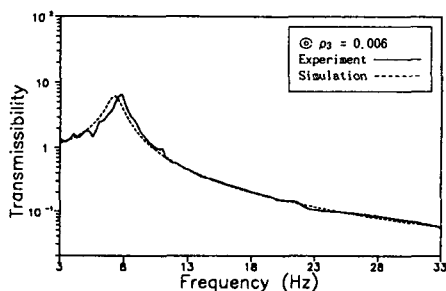


Fig. 17 Vibration characteristics of active system employing optimal control ( $\rho_3=0.006$ )

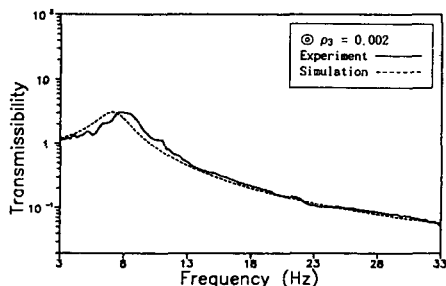


Fig. 18 Vibration characteristics of active system employing optimal control ( $\rho_3=0.002$ )

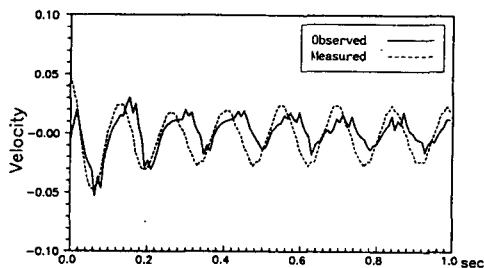


Fig. 19 Observed velocity using minimum order observer (experiment)

력값을 갖는다. 그러므로, 연속적으로 외란이 제어 영향을 주고 있는 경우에도 관측기는 실제상태를 효과적으로 추정하고 있음을 알수있다. Fig. 20은 관측기를 사용한 제어에 대한 전달율을 도시하였다.

5.2 피드포워드제어

Fig. 21에서는 7 Hz로 베이스를 가진하였을 경우 제어를 하지 않았을 때의 본체의 가속도응답, 피드백루프만 존재할 경우의 가속도응답, 피드백루프에 피드포워드 루프를 포함시킨 경우의 가속도응답을 비교하였고 또한 Fig. 22는 위의 경우에 대하여 제

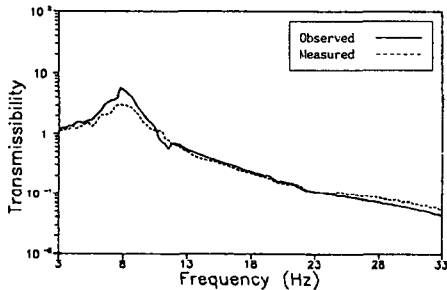


Fig. 20 Vibration characteristics of active system employing optimal control using Kalman Filter

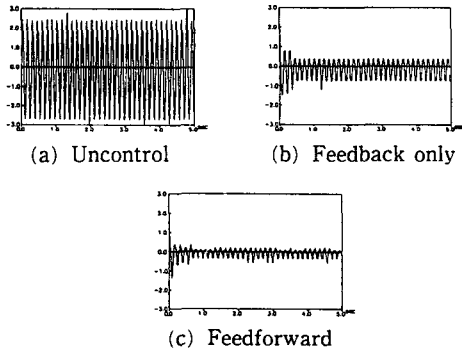


Fig. 21 Experimental results of feedforward control (acceleration)

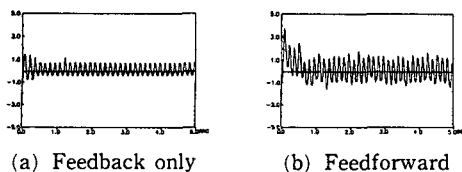


Fig. 22 Experimental results of feedforward control (controller voltage)

어입력을 측정 한 결과이다. Fig. 23은 3~33 Hz 주파수영역에서의 전달율 측정결과이다.

피드포워드 제어는 이론적으로는 응답가속도가 영으로 되어야 하지만 모델링오차와 샘플링 시간오차, 측정오차 등으로 외란에 대한 응답이 완전하게 소거되지는 않았다. 이 제어는 공진주파수 영역뿐 아니라 10~20 Hz 영역에서도 전달율이 10 dB 가량 감소하는 효과를 보여주었다.

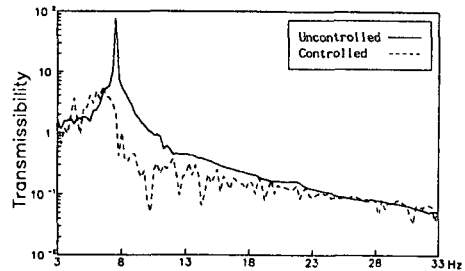


Fig. 23 Vibration characteristics of active system employing feedforward control

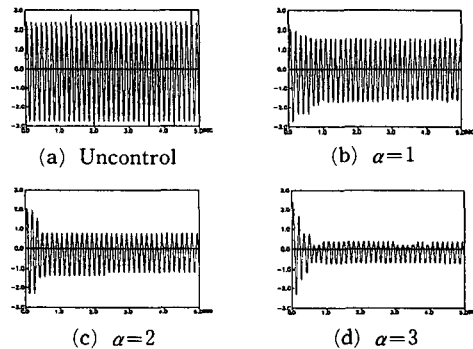


Fig. 24 Experimental results of fuzzy control (acceleration)

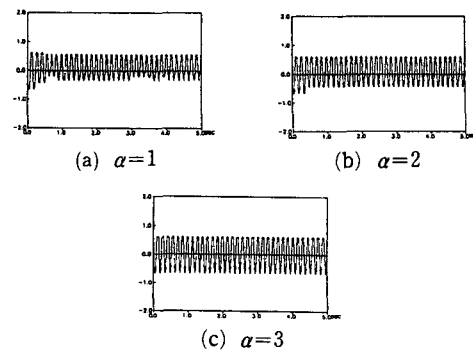


Fig. 25 Experimental results of fuzzy control (controller voltage)

5.3 퍼지제어

퍼지제어의 제진성능측정은 최적제어의 실험조건과 동일하게 가진하여 실험하였다. Fig. 24, 25에서의 결과를 보면 출력가중계수  $\alpha$ 가 증가할 수록 제진효과는 우수해지지만 많은 제어입력이 필요하였다. 제어된 본체가속도가 정상상태에 도달하는데는 0.5 sec가 필요하였다. Fig. 26의 전달율 특성에서도 역퍼지화시 출력가중계수가 증가할 수록 전달율이 크게 감소하였다. 출력가중계수를 3으로 했을 경우에 공진영역에서 전달율이 10 dB가량 감소하였다. 이때 공진주파수는 저주파 대역으로 2 Hz 감소하였다.

5.4 적응제어

적응제어의 경우에는 적절한 수렴계수와 필터차수를 찾는 것이 관건이 되지만 이는 컴퓨터의 계산 속도, 계의 특성들을 고려하여 실험적으로 정한다. Fig. 27, 28은 단일 주파수로 가진한 경우의 적응제어의 응답으로서 수렴계수를 0.0001로 고정하고 필터차수를 변화시켜 가면서 본체가속도응답을 비

교하였다. 필터차수를 10으로 하면 1초 내에 베이스 가진에 의한 본체의 가속도가 크게 감소하지만 곧 발산하였다. 필터차수가 20이상인 경우 제어효과를 얻을 수는 있었지만 수렴시간이 약 4초 가량으로 다른 제어에 비해 매우 많이 필요한 것을 알 수 있다. 정상상태에 도달한 제어된 본체가속도의 크기는 거의 영에 가까운 값을 가지므로 비교적 오랜 수렴시간이 필요하지만 좋은 제진 특성을 갖는다. Fig. 28은 필터차수에 따른 제어입력 변화로서, 차수가 10개인 경우 발산을 하므로 제어입력의 크기는 작았고, 차수가 20 이상인 경우에 계가 수렴함에 따라 3 V의 피크값을 갖는 큰 제어 입력을 필요로 하였다. Fig. 29는 필터차수를 30으로 하고 구한 전달율 선도이다. 여기서는 고주파수 대역에서 전달율이 오히려 증가하고 있다. 이는 수렴에 오랜시간이 필요한 제어의 특성 때문에 0.5 Hz/sec의 sweep rate를 갖는 주파수변화에 따른 계의 특성변화를 실시간에 추정하지 못하기 때문이다. 실험결과에서 나타난것과 같이 적응제어는 수렴시간이 비교적 많이 필요하고, 또한 적절한 수렴계수

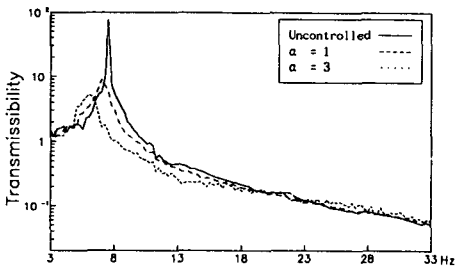


Fig. 26 Vibration characteristics of active system employing fuzzy control

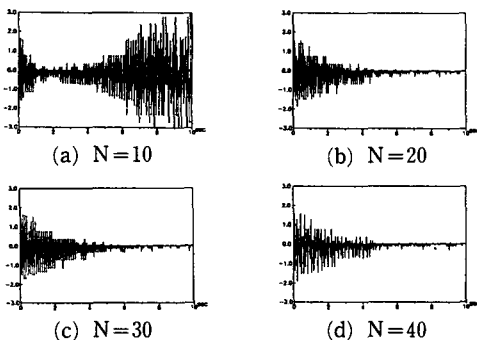


Fig. 27 Experimental results of adaptive control (acceleration)

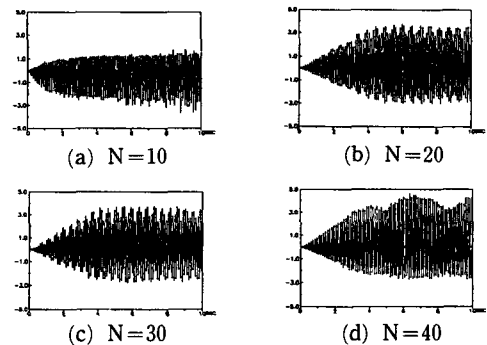


Fig. 28 Experimental results of adaptive control (controller voltage)

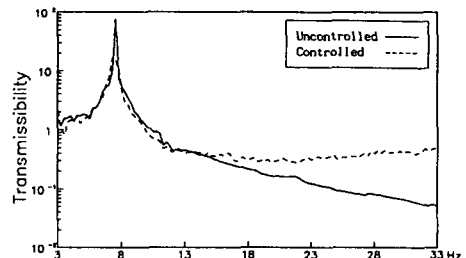


Fig. 29 Vibration characteristics of active system employing adaptive control

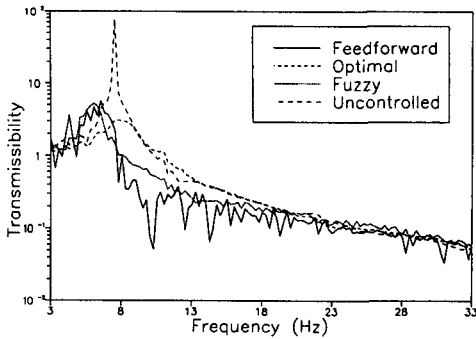


Fig. 30 Comparison of control methods for vibration isolation characteristics

와 가중치의 초기조건을 찾는 데 많은 시간이 필요하다.

### 5.5 제어알고리즘의 비교

센서의 사용, 제어에 사용하는 입력, 계산속도, 외란의 측정여부 등 적용방법과 특성이 서로 다르므로 각각의 제어알고리즘을 동등한 조건에서 비교하는 것은 불가능하지만, 본 연구에서는 진동전달율의 측면에서 성능을 비교하면 Fig. 30과 같다.

## 6. 맺음말

전자석 작동기를 이용한 1자유도 능동제진장치를 제작하여 최적제어, 피드포워드제어, 퍼지제어 그리고 적응 제어알고리즘을 적용하여 수치해석과 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 자유도 진동계의 능동제진에서 수치해석과 실험이 비교적 잘 일치하므로 본 연구에서 사용된 계의 모델링 및 제어기의 설계는 적절하였다.
- (2) 연속적인 가진을 받는계에서도 최소차 관측기를 이용하여 상태변수를 효과적으로 관측할 수 있다.

(3) 피드포워드제어는 알고리즘의 특성때문에 넓은 주파수 범위에서 우수한 제진효과를 갖는다.

(4) 적응제어는 비교적 수렴시간이 길지만 단일 주파수 외란에 대하여 우수한 제진성능을 갖는다.

## 참고문헌

- (1) Hong Su, 1990, "Vibration-Isolation Characteristics of an Active Electro-Magnetic Force Generator and the Influence of Generator Dynamics," *Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 112, pp. 8~15.
- (2) 이관호, 1991, "전기-유압식 능동흡진기에 관한 연구," 연세대학교 기계공학과 논문.
- (3) Sommerfelt Scott D., 1989, *Adaptive Vibration Control of Vibraton Isolation Mount, Using an LMS-Based Control Algorithm*, Ph. D Thesis, pp. 32~44.
- (4) 하영균, 1991, "유연한 로봇 팔 진동의 능동 제어," 연세대학교 기계공학과 석사학위논문.
- (5) 최 현, 1991, "최적제어를 이용한 드릴의 whirling 진동제어," 연세대학교 기계공학과 석사학위논문.
- (6) 김재원, 1992, "퍼지로직에 의한 유연한 단일 링크로봇의 진동제어," 연세대학교 석사학위논문.
- (7) Ogata Kasuhico, 1987, *Discrete Control of Dynamic Systems*, Prentice-Hall Inc.,
- (8) Franflin Gene F., 1990, *Digital Control of Dynamic Systems*, Addison-Wiley Publishing Company.
- (9) 김종식, 1988, *선형제어 시스템공학*, 청문각.
- (10) Astrom, 1990, *Computer-Controlled System*, Prentice-Hall Inc.